

---

# Mágneses baktériumok a Balatonban

Kósa Iлона, Pósfai Mihály

Pannon Egyetem, Föld- és Környezettudományi Tanszék, 8201 Veszprém, Pf. 158.

---

## Kivonat:

Munkánk célja a Balaton üledékében élő mágneses baktériumok vizsgálata volt. A mágneses baktérium nem taxonómiai kifejezés, olyan különböző baktériumok összességét jelenti, melyek mágneses taxissal rendelkeznek (a környezet mágneses terének irányához igazodó mozgást végeznek). Azonosítottuk a különböző sejtmorfológiai típusokat és nyomon követtük évszakos változásait. Transzmissziós elektronmikroszkóppal egész sejteket tanulmányoztunk, hogy megállapítsuk, a balatoni mintákban lévő baktériumok milyen vas-ásványt választanak ki, és melyek ezen ásványok fizikai, kémiai tulajdonságai. A magnetiten kívül a sejtek tartalmaznak amorf, P-, Ca- és S-tartalmú zárványokat is. Ezek kémiai összetételét energiadiszipatív röntgen-spektrometriával vizsgáltuk.

## Kulcsszavak:

mágneses baktériumok, magnetit, Balaton

## Bevezetés és célkitűzések

A biogén ásványképződés egyik érdekes és anyagtudományi alkalmazásokkal bíztató példáját a mágneses taxissal rendelkező (a környezet mágneses terének irányához igazodó mozgást végző) baktériumok szolgáltatják. Ezek a baktériumok a sejten belül mágneses ásványokat, vas-oxidot ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetit) illetve vas-szulfidot ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ , greigit) választanak ki (Bazylinski és Frankel, 2004). Az egyes kristályok néhányszor tíz nm átmérőjűek, ami azt jelenti, hogy mindegyikük egy-egy külön mágneses domén, azaz permanens mágnés. A szervesetlen kristályt egy foszfolipid kettősrétegből álló biológiai membrán határolja. A kristály és a membrán együttesét magnetoszómának nevezzük. A nanomágneselek a baktériumban láncot alkotnak; a kristályok a láncban olyan kristálytani orientációban helyezkednek el, hogy a lehető legnagyobb mágneses dipólusmomentummal rendelkezék a sejt (Bazylinski és Frankel, 2004).

A mágneses baktériumokat csak 1975-ben fedezték fel (Blakemore, 1975), és magyarországi vizekből 2000 óta ismertek (Pósfai és Arató, 2000). A baktériumok relatív mennyiségét a Balaton üledékében eddig senki nem vizsgálta. A munkánk egyik célja volt, hogy felderítsük, milyen sejtmorfológiai típusok fordulnak elő a Balatonban, és évszakosan hogyan változik ezek mennyisége. Vizsgáltuk továbbá a balatoni sejtekben képződött, nanométeres mágneses vas-oxid ásványok kristályszerkezeti, -kémiai jellegzetességeit. A magnetoszómákon kívül a balatoni mágneses baktériumok más zárványokat is tartalmaznak, ezek fizikai és kémiai tulajdonságait szintén tanulmányoztuk.

## Anyag és módszer

A magnetitet tartalmazó mágneses baktériumok az oxikus-anoxikus átmeneti zónában (OATZ) fordulnak elő legnagyobb számban (Bazylinski és Frankel, 2004). A legtöbb sekély édesvízi élőhelyen ez a víz/üledék határfelülettel esik egybe (Bauerline, 2000). Így környezeti mintáinkat a balatoni üledék felső néhány cm-es rétegéből gyűjtöttük 2004 tavaszától 2005 őszéig a következő helyszínekről: Balatonfüzfő, Sajkod, Tihany-Somosi strand, Gödrös. Az 1/3 részig iszappal, előlött vízzel megtöltött edényeket légmentesen lezártuk,

majd a mintákat a gyűjtést követő 1-2 napban optikai mikroszkóppal megvizsgáltuk. Ezt követően mintáinkat laboratóriumban szobahőmérsékleten, fénytől elzárva tároltuk. A mintához tápanyag utánpótlást és egyéb anyagot nem adtunk. A baktériumok mágneses tulajdonságát kihasználva a fénymikroszkópos vizsgálatokhoz a sejteket rúd mágnés segítségével gyűjtöttük össze (Pósfai és Arató, 2000). A transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) végzett vizsgálatokhoz a mágneses baktériumokban dús mintacseppet Formvar hártával és amorf szénnel bevont réz mikrostélyra cseppentettük, majd a víz elpárolgása után további mintapreparálás nélkül a mintákat az elektronmikroszkópba helyeztük. Mivel a baktériumokat nem fixáltuk, térfogatuk jelentős hányadát elvesztették a száradás során, illetve a TEM vákuumában. Ezzel a mintapreparálási módszerrel elsősorban a baktérium morfológiáját, a magnetoszóma láncok szerkezetét, az adott láncban belül található kristályok méretét és a kristályok habitusát jellemeztük. A TEM alapvető képalkotási funkcióján kívül az elektronsugár és a vizsgált minta kölcsönhatásán alapuló analitikai technikát is alkalmaztunk. A baktérium sejt, a sejten belül található zárványok kémiai összetételét energiadiszipatív röntgen-spektrometriával (EDS) vizsgáltuk. A zárványokról kvalitatív elemzések készültek.

## Eredmények és értékelés

Mindegyik élőhelyen gyűjtött mintában előfordultak vas-oxidot tartalmazó, különféle morfológiai típusú mágneses baktériumok. A balatoni üledékben háromféle, *coccus*, *spirillum* és pálca alakú sejteket figyeltünk meg az optikai mikroszkóppal végzett előzetes mintavizsgálatok során. A megfigyeléseket az 1. táblázat tartalmazza, ahol vízszintesen a mintagyűjtés, függőlegesen pedig a megfigyelések időpontját ábrázoltuk, így az oszlopokban az egyes mintákban a tárolás során bekövetkező változásokat figyelhetjük meg, fentről jobbra átlósan lefelé pedig, a friss mintákra vonatkozó megfigyeléseket nyomon követhetjük, a Balatonban bekövetkező változásokról kapunk információt. A táblázatban szereplő jelek alakja a sejtek morfológiájára, a jelek száma a mennyiségre utal.

Általában jellemző, hogy a tavasszal, nyáron és kora ősszel gyűjtött mintákat *coccus* baktériumok jellemezték, míg a késő őszeiben megjelentek a *spirillumok*. Érdekes, hogy a korábban vett, tárolt mintákban is elszaporodtak *spirillum* morfológiájú baktériumok, noha ezekben korábban *coccus* baktériumok voltak többségben. Tehát a frissen gyűjtött és a tárolt mintákban az adott időpontban ugyanazok a morfológiai típusok voltak jelen, de a 'mikrokörnyezetben', legalább néhány

hétig tárolt mintákban nagyobb mennyiségben találtunk mágneses sejteket. A Balaton különböző pontjain gyűjtött minták között nem volt különbség a tekintetben, hogy ugyanazokat a morfológiai és magnetoszóma típusokat megtaláltam az eltérő helyről származó mintákban. Ez alapján a mágneses baktériumok szempontjából a Balaton északi partjának üledéke valószínűleg homogénnek tekinthető.

mintagyűjtés időpontja	2004								2005			
	febr. 11.	márc. 17.	ápr. 01.	jún. 04.	aug. 05.	szept. 19.	okt. 22.	nov. 17.	márc. 02.	máj. 25.	jún. 22.	szept. 25.
megfigyelés												
időpontja												
2004/ febr. 11.	⊗											
márc. 16.	●●											
márc. 17.		○○○										
márc. 23.		○○○										
ápr. 01.			⊗									
ápr. 14.	●●●●											
ápr. 21.			●●●									
máj. 04.		○○○○	●●●●									
máj. 13.	●●●●	○○○○	●●●●									
jún. 04.				⊗								
jún. 30.	●●●●	○○○○		●●●								
aug. 05.				●●●●	●●●							
aug. 25.					●●●							
szept. 13.	●●●●		●●●●		●●●							
szept. 19.	●●●●		●●●●	●●●●	●●●	⊗						
okt. 6.						●●●	⊗					
okt. 22.												
okt. 26.			●●●	●●●●	~~~~	●●●●		●●				
nov. 02.												
nov. 16.	●●●●						●●●					
nov. 17.								⊗				
nov. 24.							~~~~	~~~~				
nov. 30.				●●●●	●●●●	●●●●						
dec. 07.			~~~~	~~~~	~~~~	~~~~	~~~~	~~~~				
2005/ febr. 22.				●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	⊗			
márc. 02.		○○		●●	●●●	●●●●		●	⊗			
márc. 08.	⊗	○	●●●	●●●●					⊗			
ápr. 12.			●●●									
ápr. 21.									⊗			
ápr. 25.									—:●			
máj. 04.				⊗			●		●			
máj. 25.									⊗			
máj. 26.									⊗			
jún. 01.									●●●●			
jún. 06.			⊗			●●●	●●●●		●			
jún. 13.			●●						⊗			
jún. 23.											⊗	
jún. 27.	⊗	⊗	●●	⊗	●●		●●●●	●				⊗
szept. 26.												
szept. 28.					●●●●	●●●●	●●	●●●		●●		
okt. 03.						●●●●						⊗
okt. 11.				⊗				●				⊗

○	coccus
⊗	spirillum
—	pálca
⊗	nincsen sejt
□	néhány sejt
□□	kevesebb, mint 100 sejt
□□□	baktériumokból álló sáv a csepp szélén
□□□□	néhány mikrométeres, baktériumokból álló sáv a csepp szélén
■	Balatonfűzfő
■	Somosi strand
■	Gódrós
■	Sajkod
■	TEM felvételek készültek

1. táblázat. A mágneses baktérium sejtek típusai és mennyisége a Balatonból gyűjtött minták fénymikroszkópos vizsgálatai alapján

A különböző baktériumok által termelt, eltérő magnetoszóma típusok azonosítása a sejtre és a kristályokra vonatkozó kritériumok alapján történt. A kristályok csoportokba sorolásánál figyelembe vettük a sejtmorfológiát, a magnetoszóma láncok szerkezetét, az adott láncban belül található kristályok méretét, habitusát. A baktérium morfológia a TEM felvételeken jól

felismerhető volt és a magnetoszóma láncok elrendeződése általában megőrződött. A magnetoszómák sejten belüli speciális elrendeződése alapján hat baktérium típust különböztettünk meg. Mindegyik sejtípusban a kristályok alakja és mérete különböző volt. A *coccus* morfológiájú baktériumok között a láncszerkezetet figyelembe véve négy típust figyeeltünk meg.

Az első típusban a magnetoszómák egyes láncot alkotnak (1. a ábra). A kristályok megnyúltak, vetületük téglalap alakú. A magnetoszómák maximális mérete ~120 nm. A második típusban a magnetoszómák két láncba rendeződnek (1. b ábra). A láncok a sejt ellentétes oldalán helyezkednek el. A kristályok mérete szokatlanul nagy. A láncok végén kisebb, még növekedő kristályok vannak. A habitus enyhén megnyúlt, a kristályok vetülete téglalap alakú.

A harmadik *coccus* típusban a magnetoszómák szintén két láncot alkotnak, azonban az előző típustól jelentősen különbözik a kristályok alakja és mérete. A méret kisebb és láncban belül változó. A magnetit kristályok vetülete rombusz alakú. Az 1. c ábrán ezek a magnetoszóma láncok két nagy méretű, gömb alakú amorf zárvány kíséretében láthatók.

A *coccus* sejtek negyedik típusában a magnetoszómák két kettős láncba rendeződnek, és páronként a láncok párhuzamosak egymással (1. d ábra). A kristályok enyhén megnyúltak és méretük a láncok végén csökken. A zárványok vetülete téglalap.

Előfordultak olyan *coccus* baktériumok is, melyekben a kristályok legfeljebb részleges láncokat alkotnak (1. e ábra). Ebben a típusban a kristályok szétszóródva a sejt egyik oldalán helyezkednek el. Bár nem rendeződnek láncba, a kristályok általában hossz tengelyükkel egy irányba orientálódnak. A kristályok megnyúltak, nem mutatnak egységes morfológiát. Maximális részecskeméretük ~95 nm.

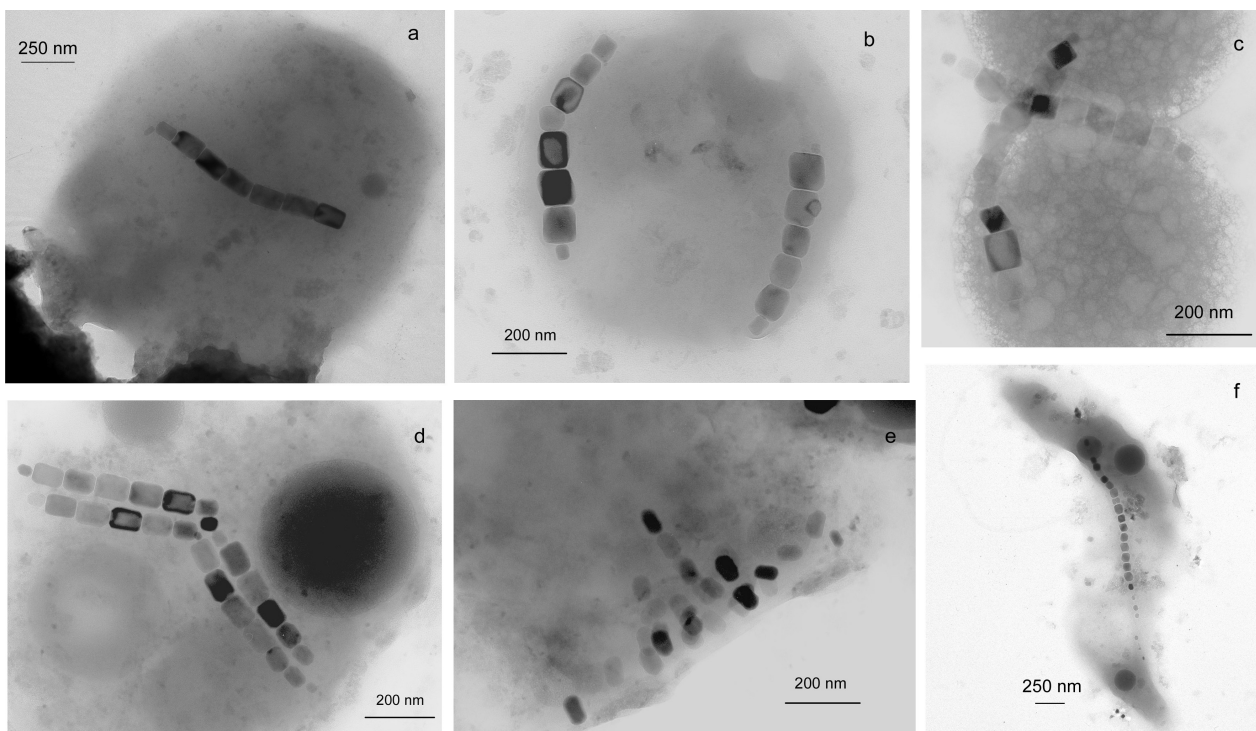
A mintákban kisebb számban előforduló *spirillum* morfológiai típusban egyetlen hosszú láncot alkotnak a magnetoszóma kristályok (1. f ábra). Ebben a típusban jól látszik, hogy a magnetoszómák a sejt hossz tengelye

mentén láncba rendeződnek. Az egyszeres láncban belül a nagyobb kristályok enyhén megnyúltak, a láncvégi kisebb kristályok vetülete lekerekített formát mutat. Kubooktaéderes habitus a jellemző. A láncban belül a magnetoszómák szorosan helyezkednek el, de a lánc végén lévő kisebb, még növekedő kristályok között nagyobb a távolság, helyet biztosítva a további növekedéshez.

Más helyeken vizsgált mágneses baktériumokkal összevetve a balatoni mintákban élő típusokat, a magnetit kristályok morfológiája és a kristályok láncokba való elrendeződése sok hasonlóságot mutat a világ különböző tájairól leírt típusokkal. Úgy tűnik, van néhány univerzális magnetoszóma típus, amely rendkívül elterjedt a világon (Flies és tsai, 2005; Akai és tsai, 1991; Cox és tsai, 2002; Arató és tsai, 2005).

baktérium morfológia	láncszerkezet	kristályhabit	ábra
	egyes lánc	megnyúlt, nagy kristályok	1a
		téglalap vetület	
		enyhén megnyúlt, nagy	1b
	2 egyes lánc	kristály, vetület: téglalap	
<i>coccus</i>		rombusz alakú	1c
	2 kettős lánc	enyhén megnyúlt,	1d
		keskeny kristályok	
	szétszór	megnyúlt, hasáb alakú,	1e
	részleges lánc	nincs egységes morfológia	
<i>spirillum</i>	hosszú lánc	kubooktaéder	1f

2. táblázat. Mágneses baktériumok morfológiai típusai és a bennük lévő magnetoszómák és ezek láncainak jellegzetességei



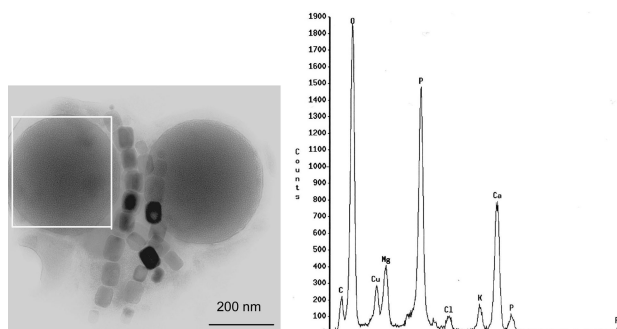
1. ábra. A különböző sejt típusokban található magnetit magnetoszómák

Az ábra egyes részeinek magyarázatát a 2. táblázat tartalmazza

A mágneses baktériumokban a magnetit láncok mellett megfigyeltünk a magnetoszómáktól jelentősen

eltérő alakú és méretű zárványokat. Ezek általában S-tartalmú szemcsék vagy P- és Ca-ban gazdag csomók. A

magnetoszómák és a csomók két kompartmentet képeznek a különböző szerkezet, morfológia és összetétel alapján. A zárványok amorf szerkezetűek, EDS vizsgálatuk alapján (2. ábra) négy, 1) P, 2) P, Ca és Mg, 3) Ca, valamint 4) Ca, S és Mg összetételi típusokat figyeltünk meg. Cox és tsai, (2002) és Lins és Farina, (1999) hasonló összetételű zárvány típusokat írtak le. A zárványok fiziológiai funkciója nem teljesen tisztázott. A sejt esetleg detoxifikálásra használhatja őket. A P-tartalmú zárványok révén lehetséges, hogy a mágneses baktériumok szerepet játszanak a balatoni üledék P forgalmában.



2. ábra P- és Ca-tartalmú zárványokat tartalmazó *coccus* sejt és a megjelölt zárvány EDS spektruma

A kutatást az OTKA-T030186 számú pályázata támogatta.

## Irodalom

Akai, J., Sato, T., and Okusa, S. (1991) TEM study on biogenic magnetite in deep-sea sediments from the Japan Sea and the Western Pacific Ocean. *Journal of Electron Microscopy*, 40, 110-117.

Arató, B., Szányi, Z., Flies, C., Schüller, D., Frankel, R.B., Buseck, P.R., and Pósfai, M. (2005) Crystal-size and shape distributions of magnetite from uncultured magnetotactic bacteria as a potential biomarker. *American Mineralogist*, 90, 1233-1241.

Bauerlein, E. (2000) *Biomining*, p. 294. Wiley, Weinheim.

Bazylinski, D.A., and Frankel, R.B. (2004) Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Reviews Microbiology*, 2, 217-230.

Blakemore, R.P. (1975) Magnetotactic bacteria. *Science*, 190, 377-379.

Cox, B.L., Popa, R., Bazylinski, D.A., Lanol, B., Douglas, S., Belz, A., Engler, D.L., and Nealson, K.H. (2002) Organization and elemental analysis of P-, S-, and Fe-rich inclusions in a population of freshwater magnetococci. *Geomicrobiology Journal*, 19, 387-406.

Lins, U., and Farina, M. (1999) Phosphorus-rich granules in uncultured magnetotactic bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 172, 23-28.

Flies, C.B., H. M. Jonkers, de Beer, D., Bosselmann, K., Böttcher, M. E. and Schüller, D. (2005) Diversity and vertical distribution of magnetotactic bacteria along chemical gradients in freshwater microcosms. *FEMS Microbiology Ecology*, 52, 185-195.

Pósfai, M., Arató, B. (2000) Magnetotactic bacteria and their mineral inclusions from Hungarian freshwater sediments. *Acta Geologica Hungarica*, 43, 463-476.

## Köszönetnyilvánítás

## Magnetotactic bacteria from Lake Balaton

I. Kósa, M. Pósfai

### Abstract:

The abundance and morphotype distribution of magnetotactic bacteria in Lake Balaton were studied from the spring of 2004 to the autumn of 2005, by observing magnetically enriched drops with an optical microscope. In order to study the physical and chemical properties of magnetosomes and their locations within cells, whole mounts were examined using transmission electron microscopy (TEM). Elemental compositions of the magnetosomes and other inclusions within the cells were determined using energy-dispersive X-ray spectrometry. We found that the distribution of different morphotypes of magnetotactic bacterium varied seasonally. Based on the spatial arrangements of magnetosomes six types of magnetotactic bacteria occurred in the samples. All of the inclusions besides magnetite were amorphous, and their composition, size and number varied in different morphological types.

### Keywords:

magnetotactic bacteria, magnetite, Lake Balaton